

УДК 621.91

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, Е.В. Островерх, канд. техн. наук,  
Н.Ф. Наконечный, канд. техн. наук, Ю.Б. Витязев, канд. техн. наук,  
Харьков, Украина

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

*В статье представлена классификация интегрированных процессов механической обработки материалов, основанная на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования на базе комплексов признаков – энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих.*

*Ключевые слова: классификация, интегрированные процессы, метод обработки, обработка материалов резанием*

*У статті наведено класифікацію інтегрованих процесів механічної обробки матеріалів, заснована на термінології, загальноприйнятою в теорії і технології розмірного формоутворення на базі комплексів ознак – енергетичних, технологічних, інструментальних і формотворчих.*

*Ключові слова: класифікація, інтегровані процеси, метод обробки, обробка матеріалів різанням*

*The classification of integrated processes of material machining, based on the terminology common in the theory and technology of dimensional shaping on the basis of the complexes of features – energy, technological, tool and shaping ones is presented in the paper.*

*Keywords: classification, integrated processes, processing method, material machining by cutting*

К настоящему времени в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки деталей.

По своей сущности методы обработки усложнились. Интенсивность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т. д. в различном их сочетании.

Все большее внимание уделяется развитию и совершенствованию методов обработки со съемом относительно небольших слоев металла и создание на поверхности и в поверхностном слое необходимых физико-механических свойств и шероховатости. Это объясняется непрерывным

совершенствованием методов получения заготовок, уменьшением припусков на механическую обработку, ростом требований к точности и необходимостью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей и изделий, применением в машиностроении новых конструкционных материалов.

Отмечается стремление к существенному повышению скорости резания и микрорезания (скоростная, сверхскоростная обработка); дальнейшее развитие нетрадиционных методов обработки. Определенное влияние на совершенствование методов обработки оказывает развитие интегрированных технологий.

Многообразие разработанных и применяемых в технологии машиностроения методов обработки, необходимость решения вопросов автоматизации технологического проектирования ставят задачу систематизации имеющихся в этой области сведений. Известно, что одни и те же детали могут быть обработаны по различным технологическим схемам, при многовариантном сочетании методов обработки.

В связи с этим представляет интерес систематизация и схематизация существующих методов обработки, выявление общих характерных признаков и классификация их на этой основе в соответствующие группы и классы. Такое построение значительно упрощает изучение и использование методов обработки, полнее выявляет их взаимосвязь и возможности совершенствования и развития. Классификация методов обработки создает предпосылки для их формализации и алгоритмизации, что является важным условием автоматизации технологического проектирования. Кроме того, разработав основные принципы построения и развития методов обработки, можно перейти от описательного метода изложения и изучения методов обработки к изучению методологии, основ их разработки.

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатывающей среды или инструмента и обрабатываемой заготовки (детали), используемых для одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя [1]. Метод обработки определяется видом используемой энергии (механической, химической, электрической, тепловой и др.), производительностью, сущностью процесса формообразования (например, со съемом материала или пластическим деформированием), типом применяемого инструмента или обрабатывающей среды и их характеристиками, кинематикой процесса и его схемой [2]. Изменение одного из перечисленных факторов вызывает изменение в названии и содержании метода обработки.

Создание интегрированных методов обработки основывается на одновременном или последовательном использовании различных видов

энергии и вызываемых ими соответствующих физических эффектов [3], способов подвода в зону обработки, совмещения воздействия различных инструментов, комбинирования кинематических схем [4].

Рациональное использование интегрированных методов обработки приводит к повышению, как производительности обработки, так и качества детали. Кроме того, в ряде случаев освоение интегрированных методов обработки позволяет достигнуть новых технических результатов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики деталей, а также достичь синергетического эффекта проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

### **1 Принципы систематики**

Отличительные признаки различных интегрированных технологий механической обработки основываются, в первую очередь, на физико-химических и технологических особенностях процессов снятия припуска и формирования обработанной поверхности деталей.

В настоящее время по принципу интеграции механической обработки с дополнительным физико-химическим воздействием на процесс удаления припуска создано и достаточно успешно реализовано большое количество технологий. Их перечень гораздо шире, чем число относимых непосредственно к обработке материалов резанием. Имеется практическая необходимость в использовании комбинированных (комплексных) способов эффективной обработки материалов резанием и пластическим деформированием непосредственно на металлообрабатывающих станках.

Поэтому представляется целесообразным и необходимым разработать классификацию интегрированных процессов обработки материалов резанием на более широкой основе, тем более, что существующая ограниченная классификация, в настоящее время характеризует лишь занятую технологическую нишу в различных отраслях производства и не является исчерпывающей, а разнообразие способов обработки требует осознанного выбора той или иной технологии.

Предлагаемая классификация интегрированных процессов резания материалов основана на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования. Такая классификация позволит приблизить понятие «интегрированные процессы резания» к разряду существующих технологических процессов изготовления, используя для этого подходы и критерии, принятые в машиностроении. Добавление признаков, определяемых спецификой рассматриваемых процессов, даст возможность более полно оценить технологические возможности интегрированных технологий и отдельных способов их реализации.

На основе проведенного анализа интегрированных процессов

механической обработки, прежде всего процессов обработки материалов резанием, выделены комплексы признаков – энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих. В рамках этих комплексов классификационные признаки разбиты на 18 групп, каждая из которых содержит от 3 до 12 признаков. Часть их заимствована [5, 6] с добавлением или изменением отдельных показателей признаков.

## **2 Комплекс энергетических признаков**

В первую очередь обращено внимание на энергетический аспект процессов. В энергетический комплекс признаков включено 5 групп:

- вид энергии, непосредственно подводимой к объекту;
- энергия, определяющая образование формы;
- распределение энергии во времени;
- подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом;
- энергоемкость процесса формообразования.

### **2.1 Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту**

Группа 1 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к объекту или на границе объекта и окружающей среды: 1.1 – механическая (энергия механического движения и взаимодействия тел или их частей); 1.2 – тепловая (энергия, связанная с движением атомов, молекул или других частиц, из которых состоит какое-либо вещество); 1.3 – электрическая (энергия электромагнитного поля, состоящая из энергии электрического поля и энергии магнитного поля); 1.4 – магнитная (энергия магнитного поля); 1.5 – электростатическая (потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов); 1.6 – химическая (энергия системы из двух или более реагирующих между собой веществ); 1.7 – лучевая (лазерная – энергия лазерного луча; светолучевая – энергия светового луча видимого света); 1.8 – ядерная.

Объектом могут являться: обрабатываемая деталь (заготовка); инструмент; зона непосредственного контакта инструмента с деталью.

Во всех случаях применительно к интегрированным процессам резания обязательным условием является наличие подвода исходной механической энергии. Дополнительный подвод различных видов энергии может существенно повышать выходные показатели процесса.

Примеры использования дополнительных видов энергии.

#### **• Механическая энергия.**

*Резание с опережающим пластическим деформированием* [7]. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) обеспечивает улучшение условий стружкообразования путем рационального изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя вследствие его

упрочнения до процесса срезания. Упрочнение осуществляют накатным устройством, создающим глубину и степень наклепа, необходимые для получения максимальной эффективности последующего процесса резания. Энергия подводится к заготовке.

*Ультразвуковое резание* [7]. Ультразвуковыми методами обработки называют способы, использующие ультразвуковые колебания; они могут применяться в качестве основного воздействия для снятия, материала (например, размерная ультразвуковая обработка) или в сочетании с другими видами воздействия (механическими, электрическими, химическими) как средство интенсификации какого-то другого метода обработки (например, механические, электрохимические или другие виды обработки с наложением на инструмент вибраций ультразвуковой частоты). Ультразвуковые колебания наиболее широко применяют для размерной обработки твердых и сверхтвердых материалов по любому сложному профилю, для очистки, пайки, дефектоскопии и других технологических процессов, а также для улучшения процессов обработки резанием. Ультразвуковыми называют упругие механические колебания с частотой, равной или выше  $16 \div 18$  кГц. При ультразвуковом резании энергия подводится к инструменту.

*Абразивная обработка шлифованием и хонингованием с наложением вибраций* [7]. Подвод механической энергии в виде колебаний к обрабатываемой детали, инструменту или СОТС улучшает эти операции. Это объясняется повышением равномерности загрузки отдельных абразивных зерен, лучшим доступом СОТС и удалением продуктов обработки.

Повышение интенсивности съема металла при абразивной обработке с вибрациями объясняется постоянной сменой рабочих граней, скоростей и углов резания, большим динамическим взаимодействием зерен и обрабатываемого материала, а также увеличением плотности сетки следов абразивных зерен на обрабатываемой поверхности. Все это ведет к снижению действующих сил и температур, а, следовательно, повышению производительности обработки и качества поверхности; при этом ликвидируются самоотпуск материала поверхности детали, микротрещины, интенсивный наклеп.

• **Тепловая энергия.** *Резание с нагревом заготовки* [7]. Одним из средств улучшения обрабатываемости резанием является искусственный подогрев материала срезаемого слоя заготовки до определенной температуры. Этот метод обработки эффективен, прежде всего, для обработки сталей и сплавов высокой прочности, тугоплавких материалов, а также нержавеющей и жаропрочных материалов. Другим подходом является искусственное охлаждение зоны резания.

• **Электрическая энергия.**

*Введение электрического тока в зону резания при лезвийной обработке* [7]. Подвод электрической энергии в зону резания является эффективным

средством улучшения обрабатываемости высокопрочных и твердых сталей. При обработке этих материалов на контактных поверхностях наблюдаются условия, близкие к сухому трению; при этом взаимодействие трущихся пар происходит по химически чистым поверхностям. В этом случае физическое состояние контактной пары инструмент - заготовка можно искусственно изменить путем ввода в зону резания электрического тока низкого напряжения. Электрический ток, распределяясь в зоне контакта инструмента и заготовки пропорционально контактным электрическим напряжениям, выделяет дополнительное количество тепла. Вследствие образования тонкой пластичной пленки создается полусухое трение, снижается коэффициент трения, повышается площадь истинного контакта трущейся пары. Пропускание электрического тока приводит к интенсификации процессов образования окисных пленок на поверхностях трения; кроме того, как разрыв электрической цепи, так и введение электрического тока оптимального направления и величины повышает эффективность процесса резания.

*Формообразование рабочей поверхности абразивных инструментов на токопроводящих связках в процессе работы [8].*

Возможны три схемы регулирования интенсивности принудительного удаления токопроводной связки круга в процессе шлифования. **Совмещенная схема.** Этой схеме соответствуют метод электроабразивного шлифования. Его суть заключается в том, что между токопроводящим кругом и токопроводящей обрабатываемой заготовкой пропускается регулируемый электрический ток. Тогда к основному процессу абразивного резания добавляется электрическая энергия, направленная на повышение эффективности процесса. В зависимости от материала зерен (абразив, алмаз, кубонит), вида электрического тока (постоянный, переменный или импульсный), полярности (прямая – круг – катод, обратная – анод) и подаваемой в зону резания жидкости (электролит, диэлектрик) сформировались названия вариантов электроабразивного шлифования. Например: электролитическое, электрохимическое, электроалмазное, алмазно-искровое и др. Все эти способы в той или иной мере позволяют регулировать воздействие на связку круга. Ограничением их технологических возможностей является обработка только токопроводных заготовок. **Автономная схема.** Этой схеме соответствует воздействие на связку круга вне зоны резания, что позволяет ее использовать при шлифовании нетокопроводных сверхтвердых поликристаллов и др. диэлектриков. В качестве метода формообразования связки целесообразно использовать электрохимический. Он позволяет выполнять формообразование на станке в процессе шлифования при отсутствии износа электрода инструмента. **Комбинированная схема** объединяет совмещенную и автономную схемы.

• **Магнитная энергия.** Магнитно-абразивная обработка. Обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками является примером

интегрированного метода обработки, в котором сочетается механическое воздействие с использованием энергии магнитного поля. По своему воздействию на обрабатываемую поверхность метод магнитно-абразивной обработки можно отнести к финишным – полирование с элементами упрочнения поверхностного слоя.

• **Электростатическая энергия.** *Ионно-плазменные процессы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент* [6]. Изменением величины электростатического поля управляют энергией ионов, что позволяет осуществлять десорбцию, миграцию поверхностных атомов и химические реакции, распыленность и имплантацию, делать очистку, синтезировать покрытие или модифицировать свойства поверхностного слоя изделия.

• **Химическая энергия.** *Применение СОТС с химически активными компонентами.* Технологическая эффективность СОТС определяется комплексом его функциональных действий (эффектов) непосредственно в процессе механической обработки – смазочного, диспергирующего, охлаждающего, моющего. Смазочное действие СОТС заключается в его экранирующем и антифрикционном эффектах вследствие образования на контактирующих поверхностях режущего инструмента и обрабатываемой заготовки вторичных структур. Диспергирующее действие СОТС проявляется как на обрабатываемой заготовке, так и в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и определяется его высокой поверхностной активностью – способностью непосредственно в зоне разрушения эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемого твердого тела (заготовки). Моющее действие СОТС проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (отделение дисперсных продуктов от поверхностей заготовки и инструмента, стабилизация продуктов диспергирования и предотвращение их последующей десорбции заготовкой, инструментом или элементами системы применения СОТС). С помощью охлаждающего действия СОТС, определяемого его теплофизическими свойствами и гидродинамическими условиями в зоне обработки, обеспечивается дополнительный отвод тепла из зоны обработки и, как следствие, – снижение контактных температур и особенно температур режущего инструмента и заготовки [9].

• **Лучевая (лазерная – энергия лазерного луча; светолучевая – энергия светового луча видимого света).**

*Резание лезвийным инструментом с локальным нагревом заготовки перед зоной резания лучом лазера.*

*Формообразование рабочей поверхности абразивного инструмента (правка) лучом лазера.*

• **Ядерная энергия.** Ядерное воздействие на современном уровне исследований практически не изучено, хотя имеются сведения о

положительном влиянии облучения на интенсивность резания труднообрабатываемых материалов, повышение предела усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках [10]. Есть основания считать, что под действием излучения происходят физические процессы на уровне атомов и молекул вещества, изменяющие внутреннюю энергию и напряжения, что может быть использовано для технологических целей в интегрированных процессах обработки. Ожидаемой областью их применения могут быть финишные операции ультрапрецизионной точности на базе интегрированных процессов нанорезания. Однако в настоящее время примеры применения ядерной энергии при размерной обработке материалов отсутствуют. Кроме этого, при облучении необходимо учитывать возможное воздействие этого явления на окружающую среду, и требуются особые меры защиты персонала и создание дорогостоящих изолированных участков, требующих существенных затрат.

## **2.2 Энергия, определяющая образование формы**

Группа 2 характеризует энергию, определяющую сьем материала и физический механизм формообразования: 2.1 – механическая (базовый вид энергии при механической обработке); 2.2 – тепловая (энергия, выделяющаяся при деформации обрабатываемого материала и работе сил трения); 2.3 – химическая (химические процессы между обрабатываемой поверхностью детали и инструментом и/или средой обработки); 2.4 – энергия фазовых переходов; 2.5 – ядерная энергия.

Примеры известных проявлений различных видов энергии [3] применительно к процессам образования формы при интегрированном формообразовании (вид энергии – форма движения материи – вид проявления).

### **• Механическая энергия при формообразовании:**

- движение твердых тел (перемещение, вращение, колебание);
- направленное движение тел и частиц (движение режущо-деформирующего инструмента, абразивных частиц; движение жидкости, газа, молекул, атомов, элементарных частиц);
- турбулентное движение частиц (движение в жидкостях, газах, плазме);
- волновые возмущения (акустические и поверхностные волны);
- упругая деформация тел (изгиб, растяжение, кручение твердых тел; сжатие твердых тел, жидкостей, газов, плазмы);
- пластическая деформация;
- хрупкое разрушение;
- межмолекулярное и межатомное взаимодействие (межмолекулярные и межатомные силы поверхностного натяжения и капиллярности на границе раздела сред, молекулярные силы сорбции).



• **Тепловая энергия при формообразовании:**

- хаотическое тепловое движение молекул и атомов (перемещение, вращение, колебание);
- тепловое движение частиц при смещении тел (смещение твердых тел, жидкостей, газов; твердых тел и жидкостей, жидкостей и газов, твердых тел и газов; смещение твердых тел, жидкостей и газов)
- тепловое движение электронов (возбуждение электронных орбит в твердых телах, жидкостях и газах);
- тепловое движение зарядов (смещение зарядов плазмы, электронно-позитронного газа, мезонного и электронно-мезонного газа).

• **Химическая энергия при формообразовании:**

- химические реакции соединения (окисление, рекомбинация, нейтрализация, полимеризация, гидратация, образование гиперфрагментов, ионизация с присоединением электрона или иона);
- химические реакции разложения (разложение молекул и полимеров, диссоциация, ионизация в процессе разложения, дегидратация);
- химические реакции замещения (замещение в электролитах, кристаллах и на границе раздела сред);
- химические реакции перехода веществ из возбужденного состояния в основное (переход твердых тел, жидкостей и газов).

• **Энергия фазовых переходов:**

- фазовые переходы первого рода (изменение агрегатного состояния и кристаллической структуры, растворение и выпаривание кристаллов);
- фазовые переходы второго рода (переход в сверхпроводящее состояние и обратно, переход ферромагнетиков в парамагнетики и обратно, переход гелия-I в гелий-II и обратно, поляризация и деполяризация диэлектриков);

• **Ядерная энергия:**

- синтез ядер (спонтанный, управляемый, импульсный, комбинированный);
- деление ядер (спонтанное, управляемое, импульсное, комбинированное);
- радиоактивные превращения (при захвате ядром электрона с К-оболочкой, при изомерных переходах, при испускании  $\gamma$ -квантов, радиоактивный распад);
- аннигиляция (лептонов, бозонов, гиперфрагментов, атомов, молекул, макросистем).

### **2.3 Распределение энергии во времени**

Группа 3 определяет характер поступления энергии к объекту: 3.1 – непрерывный, в течение всего процесса (нагрев-охлаждение); 3.2 – пульсирующий, регулярно изменяющий свою величину при неизменности направления действия; 3.3 – импульсный (воздействие, признак или параметр

которого представляет собой импульс или последовательность импульсов, т. е. имеют место временные интервалы отсутствия подачи энергии).

Применительно к обработке резанием: пульсирующий подвод механической энергии соответствует случаям периодического изменения глубины резания (неравномерность припуска) и др.; импульсный – при обработке прерывистых поверхностей или со специальным импульсным нагружением инструмента, например, ударное сверление хрупких материалов.

Применительно к интегрированным методам обработки с подачей дополнительной электрической энергии признаки данной группы соответствуют характеристикам электрического тока, подаваемого в зону формообразования; использующим луч лазера – характеристикам лазерного излучения.

#### **2.4 Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом**

Группа 4 определяет характер подвода и распределения энергии: 4.1 – точечный (воздействие отдельных абразивных частиц); 4.2 – линейный (криволинейный – воздействие режущего лезвия инструмента; обработка сканированием поверхности лазером непрерывного действия); 4.3 – поверхностный (опережающий нагрев обрабатываемого материала, деформационное выглаживание поверхности детали; электрохимическое формообразование рабочей поверхности шлифовальных кругов в процессе работы); 4.4 – объемный (термическая обработка); 4.5 – точно-линейный (воздействие отдельных закрепленных абразивных частиц, где линия – траектория их движения; сканирование поверхности импульсным лазером); 4.6 – точно-поверхностный (интегрированное воздействие отдельных абразивных частиц на обрабатываемую поверхность и др.); 4.7 – точно-объемный (интегрированное тепловое воздействие отдельных абразивных частиц на поверхностный слой обрабатываемой детали).

Признаки этой группы учитывают интеграцию в одном процессе нескольких видов подвода энергии. Так, например, обработка свободными абразивными частицами, электроэрозионные и ультразвуковые методы, характеризуются точечным (в физическом смысле) подводом энергии, но вследствие того, что частоты точечных воздействий велики, интегральная картина явления определяется уже результатом статистики массового воздействия на обрабатываемую поверхность. Этим методам обработки соответствует точно-поверхностный подвод энергии.

#### **2.5 Энергоемкость процесса формообразования**

Группа 5 характеризует удельную энергоемкость процесса, соответствующую трем энергетическим уровням, связанным с фазовыми переходами первого рода (изменение агрегатного состояния): 5.1 – низкая (до

энергии плавления); 5.2 – средняя (энергия плавления — энергия испарения); 5.3 – высокая (выше энергии испарения).

Первый энергетический уровень включает методы, при которых нарушаются силы связи только между относительно небольшой частью молекул и атомов. Поэтому при первом энергетическом уровне (верхней границей является энергия плавления материала объекта обработки) для преодоления сил связи требуются сравнительно малые энергии. Типичными представителями этой группы будут методы пластического деформирования и обработки резанием (строгание, точение, сверление, фрезерование, протягивание, микрорезание, шлифование, суперфиниширование, доводка) [4]. Второй энергетический уровень включает виды обработки с диапазоном энергий от величины плавления до величины испарения. Типичными представителями второй группы будут методы электрофизической обработки (электроконтактная, электроимпульсная, электроэрозионная, электроискровая). Третий энергетический уровень превышает энергию испарения обрабатываемого материала. Сюда относятся электрохимический и лучевой (лазерный или светолучевой) методы обработки.

### **3 Комплекс технологических признаков**

В первую очередь комплекс характеризует технологические особенности процессов. В технологический комплекс признаков включено 2 группы: вид среды обработки; давление среды обработки.

#### **3.1 Вид среды обработки**

Под средой обработки (рабочей средой) будем понимать вещество, заполняющее пространство, непосредственно примыкающее к обрабатываемой детали и инструменту. Для контактных методов обработки (резание и пластическое деформирование) среду обработки принято называть смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС) или смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ). В ряде случаев для интегрированных процессов обработки среда обработки может выполнять функции инструмента. Например, гидроструйное и гидроабразивное резание и др.

Для бесконтактных методов обработки, работающих с гарантированным зазором между инструментом и деталью – рабочей средой. К бесконтактным методам обработки относятся отдельные методы физико-химической обработки (например, электрохимическая и электроэрозионная).

Среда обработки может быть газообразной, жидкой и твердой (по агрегатному состоянию вещества) или представлять собой дисперсную систему. Дисперсные системы, состоят из множества частиц какого-либо тела (дисперсная фаза), распределенных в однородной среде (дисперсионной среде). Характеризуются сильно развитой поверхностью раздела между фазами. Примеры: эмульсия (частицы масла в жидкости); суспензия (твердые частицы в жидкости); туман (частицы жидкости в газе); дым, пыль (твердые

частицы в газе).

Группа 6 характеризует среду обработки и может быть следующих видов: 6.1 – воздух; 6.2 – инертные газы; 6.3 – химически активные газы; 6.4 – вакуум; 6.5 – вода техническая; 6.6 – электролиты; 6.7 – диэлектрические жидкости (масла, керосин); 6.8 – расплавы легкоплавких металлов; 6.9 – эмульсии; 6.10 – суспензии; 6.11 – пылевидные частицы; 6.12 – твердые смазки (дисульфид молибдена и др.).

### **3.2 Давление среды обработки**

Группа 7 определяет относительный уровень давления среды обработки: 7.1 – пониженное (нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент); 7.2 – нормальное (атмосферное); 7.3 – повышенное (подача СОЖ при обработке резанием); 7.4 – высокое (прокачка электролита в межэлектродном зазоре при размерной электрохимической обработке); 7.5 – особо высокое (гидроструйное и гидроабразивное резание).

## **4 Комплекс инструментальных признаков**

Комплекс инструментальных признаков в первую очередь ориентирован на базовые процессы механической обработки с учетом возможности их интегрирования с электро-физико-химическими воздействиями.

Понятие «инструмент» в интегрированных технологиях не всегда идентичен такому же понятию в традиционных технологиях, например, роль «инструмента» может выполнять луч лазера, струя жидкости и др.

В комплекс инструментальных признаков включено 7 групп:

- конструктивные элементы инструмента;
- конструктивные признаки инструмента;
- соотношение процессов резания и пластического деформирования;
- виды рабочих движений инструмента;
- характер рабочих движений инструмента;
- скорость рабочих движений инструмента;
- жесткость рабочей части инструмента.

Уровень и производительность процессов механической обработки в большой мере определяются используемым инструментом.

Инструмент — орудие человеческого труда или исполнительный механизм машины. По принципу использования различают следующие виды инструмента: 1 – ручной, 2 – станочный (машинный), 3 – механизированный (ручные машины), 4 – измерительный (контрольно-измерительный), 5 – вспомогательный. Далее будем рассматривать только станочный (машинный) инструмент.

Инструмент станочный (машинный) – исполнительный элемент станка (машины) непосредственно взаимодействующий с обрабатываемым объектом (заготовкой, деталью).

Инструмент станочный (машинный) является съёмным (сменным) элементом (т. е. заменяемым элементом) для его замены в случае износа или необходимости изменения его разновидности в связи с особенностями задач обработки. Износ инструмента может быть нормальным (достижение заданного критерия износа) или катастрофическим (поломка или разрушение инструмента).

#### **4.1 Конструктивные элементы инструмента**

Группа 8 характеризует тип конструктивных элементов: 8.1 – режущие или деформирующие элементы; 8.2 – присоединительные элементы (с базовыми поверхностями); 8.3 – вспомогательные элементы; 8.4 – объединяющий элемент.

Рассмотрим более подробно элементы инструмента [11] с учетом того, что при соответствующем конструктивном выполнении режущее лезвие функционально трансформируется в деформирующий элемент. В общем случае режущие или деформирующие элементы можно рассматривать как рабочие элементы, т. е. непосредственно участвующие в процессе обработки.

*Режущие элементы* (элементарные резцы) содержат режущие лезвия и предназначены для осуществления процесса резания. Это зубья, пластины из инструментальных материалов (в том числе сменные многогранные), ножи, вставки, элементарные резцы и т. п. Заметим, что в отличие от других элементарных резцов зубья конструктивно не оформлены и не имеют собственных присоединительных элементов. Зубья характерны для цельных инструментов, в то время как конструктивно оформленные элементарные резцы характерны для сборных инструментов с разъемным соединением,

*Присоединительные элементы* с установочными базовыми поверхностями предназначены для установки, базирования, присоединения и крепления режущего инструмента к станку или приспособлению, а также для передачи сил, моментов и движений. Это державки, оправки, «ласточки хвосты», цилиндрические и конические хвостовики, базовые отверстия и торцы, шпоночные пазы и т. п.

*Вспомогательные элементы* служат для размещения, отвода, разделения стружки; размещения и крепления режущих элементов; направления инструмента во время работы; его наладки и регулировки; подвода СОТС и др. Вспомогательные элементы могут быть отдельными деталями или частью цельной конструкции. К ним относятся: стружечные канавки и уступы; накладные стружколомы; стружкоразделительные канавки; пазы; прихваты; штифты; винты; клинья; компенсаторы; направляющие и т. п.

*Объединяющий элемент* предназначен для размещения режущих и других элементов с объединением их в единое целое. Как правило, у сборных инструментов объединяющим элементом является корпус, а у цельных — та или иная условно выделяемая промежуточная часть между элементами.

В состав перечисленных конструктивных элементов входят ограничивающие их поверхности и линии (геометрические элементы), например, передняя и задняя поверхности, режущая кромка, базовые поверхности.

Кроме того, принято выделять также составные части инструмента, каждая из которых является совокупностью тех или иных элементов.

*Режущая часть* содержит режущие элементы, не участвующие в процессе формообразования. Она служит только для срезания припуска, ее кромки не соприкасаются с заданной чертежом поверхностью детали. Режущую часть иногда называют «заборной» (от понятия «забирать» обрабатываемый материал).

*Калибрующая часть* содержит режущие элементы, участвующие в процессе формообразования и формирующие поверхность обрабатываемой детали с заданными размерами и свойствами.

Совокупность режущей и калибрующей частей называют *рабочей частью* режущего инструмента. Наличие всех указанных элементов и составных частей не всегда обязательно. Например, иногда отсутствуют вспомогательные элементы, калибрующая часть совпадает с режущей частью и т. п.

#### **4.2 Конструктивные признаки инструмента**

Группа 9 характеризует конструктивные признаки инструмента по целостности и виду соединения частей и элементов: 9.1 – цельный или монолитный (инструмент, изготовленный из одной заготовки); 9.2 – составной (инструмент с неразъемным соединением его частей и элементов); 9.3 – сборный (инструмент с разъемным соединением его частей и элементов, которые в свою очередь могут быть как цельными, так и составными).

Составной режущий инструмент или элемент может быть сварным, клееным, паяным и др. (т. е. может использоваться любое, конструктивно и технологически оправданное, неразъемное соединение).

Особым случаем формирования рабочей части инструмента является нанесение износостойких покрытий или наваривание инструментального материала (неразъемное соединение).

#### **4.3 Соотношение процессов резания и пластического деформирования**

Группа 10 характеризует тип инструмента по соотношению процессов резания и / или пластического деформирования: 10.1 – режущий инструмент; 10.2 – режуще-деформирующий инструмент; 10.3 – деформирующе-режущий инструмент; 10.4 – деформирующий инструмент.

• **Режущий инструмент.** Для этого типа инструментов преобладающим является процесс резания — снятие стружки при несущественных остаточных

деформациях поверхностного слоя детали. Режущий инструмент принято разделять на лезвийный (резцы, фрезы, сверла, зенкеры, развертки, протяжки, прошивки и др.) и абразивный (шлифовальные круги, сегменты, бруски и др.). В результате механической обработки резанием поверхностные слои пластически деформируются при их превращении в стружку, что сопровождается их упрочнением (наклепом) и формированием в них остаточных напряжений.

• **Режуще-деформирующий инструмент.** Такой тип инструмента совмещает в себе режущие и деформирующие элементы. Например, режуще-деформирующая протяжка, метчик-раскатник и др.

• **Деформирующе-режущий инструмент.** Для инструментов этого типа преобладающим является процесс пластической деформации сопутствующий фрикционным явлениям. Например, пилы и ленты для фрикционной резки материалов, иглофрезы.

*Фрикционная резка* является примером положительного использования тепловых явлений [7]. Процесс фрикционного резания быстро вращающимся диском осуществляется путем разупрочнения обрабатываемого материала, под действием выделяющегося при трении тепла. Относительно низкая теплопроводность жаропрочных, нержавеющей сталей и титановых сплавов способствует применению этого метода, так как повышает локализацию температуры в зоне резания, увеличивая степень размягчения и разупрочнения; вращение диска создает его надежное охлаждение.

*Иглофреза* представляет собой специальную конструкцию плотной проволочной щетки [12]. Иглофрезы используют не только для очистки, но и при определенных условиях, для съема значительных слоев металла (до 4 мм за один проход). Отличительной особенностью иглофрез является большая плотность ворсовой части. Собранная под большим давлением ворсовая часть иглофрезы обладает большой жесткостью. При работе иглофрез ворсинки в силу значительной плотности и взаимного расположения отклоняются лишь на небольшой угол, представляя собой своеобразный полужесткие деформирующе-режущие элементы.

• **Деформирующий инструмент.** Такой тип инструмента имеет только деформирующие элементы и в процессе его работы стружка не образуется. Примеры деформирующих инструментов: выглаживатели (сферические – трение скольжение, шариковые или роликовые – трение качения); накатники для накатки рифлений (прямых или сетчатых); ролики резьбовые для формирования наружной резьбы; раскатники для формирования внутренней резьбы; сверла для фрикционного бесстружечного сверления.

Группы 11÷13 расширяют понятие рабочих движений инструмента.

#### **4.4 Виды рабочих движений инструмента**

Группа 11 характеризует виды движений в системе координат изделия:

11.1÷11.3 – прямолинейное по осям  $X, Y, Z$ ;

11.4÷11.6 – вращательное вокруг осей  $X, Y, Z$ .

Общая классификация схем резания применительно к механической обработке поверхностей впервые была разработана Г.И. Грановским [13]. Кинематические схемы учитывают возможные комбинации двух движений: вращательного и поступательного. На этой основе классифицированы все возможные, в том числе и не нашедшие практического применения, принципиальные кинематические схемы резания (по группам): I – одно прямолинейное движение; II – два прямолинейных; III – одно вращательное; IV – одно вращательное и одно прямолинейное; V – два вращательных; VI – два прямолинейных и одно вращательное; VII – два вращательных и одно прямолинейное движение; VIII – три вращательных движения.

#### **4.5 Характер рабочих движений инструмента**

Группа 12 характеризует характер отдельных рабочих движений и их комбинаций по виду траектории результирующего движения и характеру изменения скорости: 12.1 – прямолинейное параллельное одной из координатных осей; 12.2 – прямолинейное параллельное одной из координатных плоскостей; 12.3 – прямолинейное пространственное (траектория – прямая линия); 12.4 – криволинейное плоское (траектория лежит в одной плоскости); 12.5 – криволинейное пространственное; 12.6 – поступательное; 12.7 – возвратно-поступательное; 12.8 – циклическое; 12.9 – осциллирующее; 12.10 – вероятностное; 12.11 – фрактальное; 12.12 – отсутствует.

Вероятностный тип движений имеет место при обработке свободным абразивными частицами. Фрактальное движение — может использоваться для уменьшения температурных деформаций при генеративных (аддитивных) методах формообразования.

#### **4.6 Скорость рабочих движений инструмента**

Группа 13 характеризует скорости рабочих движений:

13.1 – низкая; 13.2 – средняя; 13.3 – высокая.

Уровень скоростей рабочих движений инструмента целесообразно согласовать со скоростями при традиционной обработке резанием: низкая – менее  $10^{-5}$  м/с соответствует уровню линейных скоростей износа инструмента; средняя –  $10^{-5}$ ÷1 м/с – применяемым скоростям подачи; высокая – более 1 м/с – скоростям резания. Значения интервалов в достаточной мере условны с учетом существенной разницы скоростей рабочих движений при лезвийной и абразивно-алмазной обработке.

#### **4.7 Жесткость рабочей части инструмента**

Группа 14 характеризует условную жесткость рабочих элементов инструмента: 14.1 – жесткий (режущий и деформирующий инструмент);



14.2 – полужесткий (иглофрезы); 14.3 – маложесткий (инструмент для полирования и финишной обработки); 14.4 – условно нежесткий (струйная или струйно-абразивная обработка, магнитно-абразивной обработка, виброабразивная обработка)

### **5. Комплекс признаков формообразования**

Комплекс формообразующих признаков был рассмотрен как замыкающий и включает в себя 4 группы:

- метод размерного формообразования;
- главный физический процесс, определяющий размерное формообразование;
- характер формообразования;
- состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования.

#### **5.1 Элементы теории формообразования**

Вопросы формообразования поверхностей резанием достаточно подробно рассмотрены П.Р. Родиным [14] и Б.А. Перепелицей [11].

Механическая обработка состоит из двух взаимосвязанных процессов: процесса срезания припуска и процесса формообразования.

Формообразование – это образование требуемой формы детали, определяемой геометрическим характером и взаимным расположением ограничивающих ее поверхностей, а также параметрами макро- и микрогеометрии.

Если рассматривать задачу чисто геометрически, без учета сил, тепловых явлений, износа инструмента и технологических особенностей процесса, то формообразование – это получение заданных чертежом поверхностей детали.

Формообразование осуществляют формообразующие элементы (точки, линии или поверхности), принадлежащие инструменту и контактирующие с поверхностью детали при обработке. При обработке резанием формообразующими являются точки или линии на режущих кромках, а при обработке давлением формообразующими являются рабочие поверхности инструментов. Формообразующая поверхность используется и при резании, но лишь условно, в качестве промежуточной инструментальной поверхности. Непосредственный контакт с поверхностью детали осуществляют контактные элементы, расположенные на формообразующих элементах. Контактными элементами могут быть точки, линии или поверхности. Контактный элемент может быть фиксированным (неизменно расположенным) на формообразующем элементе, текущим (изменяющим положение) или полностью совпадающим с формообразующим элементом.

В процессе формообразования инструмент совершает относительно

обработанной детали формообразующие движения и, контактируя с поверхностью детали своими формообразующими элементами, производит формообразование.

Таким образом, процесс формообразования включает в себя:

- деталь с ограничивающими ее поверхностями (поверхность детали Д);
- инструмент с формообразующими элементами (исходная инструментальная поверхность И);
- формообразующие движения ФД (кинематика формообразования).

Методы формообразования могут различаться типами формообразующего и контактного элементов (поверхность, линия, точка); формообразующим движением; характером контактирования (непрерывное или прерывистое) и другими признаками.

## **5.2 Метод размерного формообразования**

Предлагаемая классификация методов размерного формообразования является достаточно условной и не заменяет классификации [11, 14], направленные в первую очередь, на проектирование сложно-профильных режущих инструментов. Методы размерного формообразования можно разбить на три подгруппы: копирования, кинематический и комбинированный [5].

Группа 15 определяет метод формирования формообразующих поверхностей детали: 15.1 – копирования (а – формы и размеров инструмента, б – только формы); 15.2 – кинематический (точечный); 15.3 – комбинированный.

### **• Размерное формообразование методом копирования.**

Метод копирования объединяет процессы формообразования, в которых форма инструмента является определяющей. В этом случае формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как линия или поверхность. В одних случаях (а) на детали копируется форма и размеры (мерный инструмент), в других – только форма инструмента (б).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров только за счет геометрии инструмента (а):

- протягивание, деформирующее протягивание, прошивание, дорнование внутренних поверхностей (ФД – прямолинейное);
- нарезание наружной резьбы плашками круглыми, накатывание – резьбонакатными роликами (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента);
- накатывание наружной резьбы плашками плоскими (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента);
- нарезание внутренней резьбы метчиками, раскатывание – метчиками-раскатниками (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемые конструкцией инструмента);

- сверление, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, доводка цилиндрических отверстий (ФД: вращательное и прямолинейное);
- доводка конических отверстий (ФД: вращательное).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет геометрии инструмента и заданного относительного расположения детали и инструмента (б):

- строгание, долбление, протягивание наружных поверхностей (ФД – прямолинейное);
- нарезание резьбы резцами и гребенками (ФД: вращательное и прямолинейное);
- фрезерование канавок цилиндрических прямозубых зубчатых колес профильными дисковыми и пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное);

**• Кинематический метод размерного формообразования.**

Кинематический метод объединяет процессы обработки поверхностей для случая, когда форма инструмента не является определяющей. В таких случаях формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как точка, имеющая заданную траекторию движения относительно детали – форма инструмента не рассматривается, т. к. не оказывает влияния на поверхность детали. Формообразующая точка – точка контакта калибрующего элемента инструмента с поверхностью детали. Положение такой точки в инструментальной системе координат будет постоянным для случая обработки плоскостей и тел вращения с прямоугольной образующей.

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет траектории движения формообразующей точки инструмента:

- строгание плоских поверхностей (ФД – два прямолинейных);
- точение и растачивание цилиндрических поверхностей (ФД: вращательное и прямолинейное);
- точение и растачивание конических поверхностей (ФД: вращательное и два прямолинейных);
- фрезерование плоскостей торцовыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное).

**• Комбинированный метод размерного формообразования.**

Комбинированный метод объединяет процессы формообразования, в которых форма поверхности детали образуется в результате совмещения копирования исходной инструментальной поверхности и заданных формообразующих движений. Комбинированный метод отличается от метода копирования добавлением еще одного формообразующего движения.

Одной из разновидностей комбинированного метода формообразования является метод обкатки при обработке зубчатых колес. При обработке методом обкатки поверхности зубьев получаются в результате обработки

инструментом, режущие кромки которого представляют собой профиль сопряженной рейки или профиль зуба сопряженного колеса, и во время обработки инструмент с заготовкой образует сопряженную (правильно зацепляющуюся) зубчатую пару.

Примеры процессов формообразования комбинированным методом:

- точение и растачивание фасонных поверхностей с непрямолинейной образующей (ФД: вращательное и два прямолинейных);
- фрезерование винтовых канавок дисковыми фрезами (ФД: вращательное и одно или два прямолинейных);
- фрезерование сложных поверхностей фасонными пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и три прямолинейных).

Примеры процессов формообразования комбинированным методом обкатки:

- фрезерование зубчатых колес и шлицевых валов червячными фрезами (ФД: два вращательных и одно прямолинейное);
- зубодолбление – строгание зубьев инструментом в виде зубчатого колеса (долбяка), контур торца зубчатого венца которого служит режущей кромкой (ФД: два вращательных и одно прямолинейное);
- шевингование зубчатых колес дисковым шевером – многолезвийным инструментом в виде зубчатого колеса с лезвиями на боковых поверхностях его зубьев, для обработки боковых поверхностей зубьев, при которой для осуществления резания используется относительное скольжение (ФД: два вращательных);
- шлифование эвольвентных зубьев тарельчатыми кругами (ФД: вращательное и прямолинейное).

### **5.3 Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование.**

Группа 16 характеризует основные физические процессы, определяющие размерное формообразование (размерный съем материала, размерную деформацию, размерное соединение частиц и т. п.): 16.1 – пластическая деформация; 16.2 – хрупкое разрушение (скалывание); 16.3 – плавление (отвердевание); 16.4 – испарение (конденсация); 16.5 – химическое растворение; 16.6 – электролиз растворов или расплавов; 16.7 – кристаллизация из растворов или расплавов; 16.8 – направленное взаимодействие наэлектризованных или намагниченных частиц; 16.9 – взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов; 16.10 – ядерные преобразования вещества.

При обработке резанием лезвийным и абразивным инструментом будут иметь место пластическая деформация и хрупкое разрушение. В случае полирования или доводки может иметь место химическое воздействие активных сред. Поверхностно-упрочняющая обработка (деформирующее

протягивание, выглаживание, раскатка и др.) – пластическая деформация. Интегрированные методы обработки с использованием дополнительных физико-химических воздействий могут включать в себя процессы плавления, испарения и химические реакции и др. Аддитивные (генеративные) методы могут включать в себя процессы, связанные с добавлением материала при размерном формообразовании.

#### **5.4 Характер формообразования**

Группа 17 характеризует основной процесс формообразования: 17.1 – удаление материала заготовки; 17.2 – изменение расстояния между точками твердого тела; 17.3 – нанесение (наращивание) материала.

Удаление материала заготовки соответствует процессам обработки материалов резанием. Изменение расстояния между точками твердого тела – методам поверхностно-упрочняющей обработки (деформирующее протягивание, выглаживание, раскатка и др.). Нанесение (наращивание) материала соответствует методам генеративных (аддитивных) технологий. В контексте рассматриваемых вопросов – это нанесение износостойких покрытий на инструмент и защитно-декоративные покрытия поверхности детали для защиты от коррозии и придания эстетического внешнего вида.

#### **5.5 Состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования**

Применительно к интегрированным процессам обработки в качестве обрабатываемого объекта может выступать как обрабатываемая деталь, так и инструмент. Например, при формообразовании (правке) рабочей поверхности шлифовальных кругов объект – инструмент.

Группа 18 определяет физическое состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования (состояние «стружки») [5]: 18.1 – твердое (обработка резанием лезвийным и абразивным инструментом с закрепленными режущими элементами); 18.2 – твердое диспергированное (обработка резанием хрупких материалов, обработка свободными абразивными зёрнами); 18.3 – в расплаве (при использовании в качестве СОТС расплавов); 18.4 – в жидком растворе (при электрохимическом растворении); 18.5 – капельно-жидкое (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов); 18.6 – парообразное (при введении лучевой энергии); 18.7 – газообразное ионизированное (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов); 18.8 – газообразное нейтральное (при введении лучевой энергии); 18.9 – исходное состояние не изменяется (обработка резанием и пластическим деформированием); 18.10 – «стружка» отсутствует (обработка пластическим деформированием).

Знание конечного состояния отходов позволяет составить

энергетический баланс процесса формообразования [5]. Чем выше энергосодержание «стружки» (газ, пар, жидкое состояние, твердое диспергированное вещество и т. д. по степени снижения внутренней энергии), тем более энергоемок процесс в целом.

Энергоемкость процесса формообразования интегрированными методами обработки имеет тенденцию к снижению в следующих случаях:

- чем меньше материала заготовки переходит в «стружку» и чем ниже ее энергосодержание;

- чем меньше изменений вносится в материал изделия по сравнению с исходным материалом заготовки;

- чем меньше происходит потеря энергии в окружающую среду.

Предложенная классификация позволяет с единых позиций рассматривать и оценивать характеристики различных интегрированных процессов обработки материалов. Классификационные признаки и их группирование, не заменяют, а дополняют различные существующие системы классификации отдельных процессов, методов и способов обработки материалов.

**Список использованных источников:** 1. Сущность и технологические возможности комбинированных методов обработки: Конспект лекций / А.П. Бабичев, Ю.П. Анкудимов, Т.Н. Рысева, М.А. Тамаркин. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1990. – 74 с. 2. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник [для высш. учебн. заведений] / А.И. Грабченко, В.А. Залогов, Ю.Н. Внуков и др.; под общ. ред. А.И. Грабченко и В.А. Залогов. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с. 3. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др.; Под общ. ред. В.А. Лукьянца. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с. 4. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с. 5. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. – М.: Машиностроение, 1967. – 294 с. 6. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.]; под ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – 416 с. 7. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высш. школа, 1974. – 587 с. 8. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Залогов В.А., Новоселов Ю.К., Якубов Ф.Я.; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. – 534 с. 9. Машиностроение. Энциклопедия: В 40 т. / Машиностроение. – М., 2000. – Т. III-3: Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Суслова. – 840 с. 10. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с. 11. Перепелица Б.А. Автоматизированное профилирование режущих инструментов (теория и алгоритмы): Учебное пособие. – Харьков: ХПИ, 1985. – 107 с. 12. Ермаков Ю.М. Состояние и тенденции развития комбинированных способов механической обработки. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 48 с. 13. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М: Машгиз, 1948. – 200 с. 14. Родин П.П. Основы проектирования режущих инструментов: Учебник. – К.: Выща шк., 1990. – 424 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sushhnost' i tehnologicheskie vozmozhnosti kombinirovannykh metodov obrabotki: Konspekt lekcij / A.P. Babichev, Ju.P. Ankudimov, T.N. Ryseva, M.A. Tamarkin. – Rostov n/D: RISHM, 1990. – 74 s. 2. Integrirovannye processy obrabotki materialov rezaniem: uchebnik [dlja vyssh. uchebn. zavedenij] / A.I. Grabchenko, V.A. Zaloga, Ju.N. Vnukov i dr.; pod obshh. red. A.I. Grabchenko i V.A. Zalogi. – Sumy: Universitetskaja kniga, 2017. – 451 s. 3. Fizicheskie

jeffekty v mashinostroenii: Spravochnik / V.A. Luk'janec, 3.I. Almazova, N.P. Burmistrova i dr.; Pod obshh. red. V.A. Luk'janca. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 224 s. 4. Ermakov Ju.M. Kompleksnye sposoby jeffektivnoj obrabotki rezaniem: Biblioteka tehnologa. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 272 s. 5. Jelektroimpul'snaja obrabotka metallov / A.L. Livshic, A.T. Kravec, I.S. Rogachev, A.B. Sosenko. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 294 s. 6. Integrirovannye generativnye tehnologii: ucheb. posobie [dlja stud. vys. ucheb. zavedenij] / A.I. Grabchenko, Ju.N. Vnukov, V.L. Dobroskok [i dr.]; pod red. A.I. Grabchenko. – Har'kov: NTU "HPI", 2011. – 416 s. 7. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemyh materialov. – M.: Vyssh. shkola, 1974. – 587 s. 8. Osnovy teorii rezanija materialov: uchebnik [dlja vyssh. uchebn. zavedenij] / Mazur N.P., Vnukov Ju.N., Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Zaloga V.A., Novoselov Ju.K., Jakubov F.Ja.; pod obshh. red. N.P. Mazura i A.I. Grabchenko. – 2-e izd., pererab. i dopoln. – Har'kov: NTU "HPI", 2013. – 534 s. 9. Mashinostroenie. Jenciklopedija: V 40 t. / Mashinostroenie. – M., 2000. – T. III-3: Tehnologija izgotovlenija detalej mashin / A.M. Dal'skij, A.G. Suslov, Ju.F. Nazarov i dr.; Pod obshh. red. A.G. Suslova. – 840 s. 10. Smolencev E.V. Proektirovanie jelektricheskikh i kombinirovannyh metodov obrabotki. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 511 s. 11. Perepelica B.A. Avtomatizirovannoe profilirovanie rezhushhih instrumentov (teorija i algoritmy): Uchebnoe posobie. – Har'kov: HPI, 1985. – 107 s. 12. Ermakov Ju.M. Sostojanie i tendencii razvitiya kombinirovannyh sposobov mehanicheskoj obrabotki. – M.: VNIITJeMR, 1985. – 48 s. 13. Granovskij G.I. Kinematika rezanija. – M: Mashgiz, 1948. – 200 s. 14. Rodin P.R. Osnovy proektirovanija rezhushhih instrumentov: Uchebnik. – K.: Vyshha shk., 1990. – 424 s.